

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.001.57

Е.М. Игумнова, И.Е. Тимченко

Динамико-стохастическое моделирование природных процессов

Предложен метод построения динамико-стохастических моделей природных систем, основанный на усвоении данных наблюдений в прогностических уравнениях взаимосвязанных процессов. Метод адаптивного баланса влияний применен в этих моделях для получения эволюционных уравнений процессов и усвоения в них данных наблюдений. Полученные общие уравнения рассмотрены на примере морской экосистемы, в которой развиваются четыре взаимосвязанных процесса. Показано, что оптимальное прогнозирование этих процессов требует решения 11 систем уравнений, в которых происходит одновременная адаптация прогностических оценок и коэффициентов моделей к наблюдениям. Рассмотрен имитационный вычислительный эксперимент, поясняющий алгоритм предложенного метода моделирования. Делается вывод о перспективности его использования в геоинформационных системах контроля природной среды.

Введение. Динамико-стохастические модели (*DSM — Dynamic-Stochastic Models*) океана представляют собой уравнения динамики океана, дополненные стохастическими алгоритмами усвоения данных наблюдений. Обычно они используются для построения диагностических и прогностических карт полей океана. Принцип построения *DSM* заключается в условном по отношению к наблюдениям осреднении уравнений динамики океана [1, 2]. При практическом построении *DSM* в качестве алгоритма интерполяции наблюдений применяется теория интерполяции стационарных случайных функций А.Н. Колмогорова [3], которая послужила основой для развития методов объективного анализа полей океана [4].

В этой теории предполагается, что измерения случайного процесса генерируют в сечениях его ансамбля реализаций условные распределения вероятностей. Средние значения этих распределений являются наилучшими (в классе линейных оценок) приближениями к истинным процессам. Для их нахождения необходимо выполнить интерполяцию наблюдений с оптимальными весовыми коэффициентами, которые могут быть получены из системы уравнений Колмогорова, если известна корреляционная функция данного процесса. Наилучшей оценкой значения поля в данной точке является сумма взвешенных с некоторыми весами двух слагаемых: прогноза поля по динамической модели и «невязки» прогноза, т. е. результата интерполяции в данную точку поля ошибок прогноза по отношению к наблюдениям.

Этот подход к построению оптимальной оценки случайного процесса может быть распространен и на системы взаимосвязанных природных процессов. При объективном анализе полей океана подобная задача, получившая название «статистическое согласование полей», была решена в ряде исследований [4, 5]. В последнее время статистическое согласование взаимосвязан-

ных процессов приобретает новое значение в связи с проблемой моделирования сложных эколого-экономических систем, к которым относятся, например, природно-хозяйственные комплексы море — суша [6]. Сущность проблемы заключается в построении динамических уравнений системы, которая объединяет в себе множество разнородных процессов: гидрофизических, гидрохимических, экологических, экономических и др. Все эти процессы связаны между собой стохастическими зависимостями, информация о которых заключена во временных рядах наблюдений, накапливаемых в банках данных. Реанализ архивных данных должен обеспечить построение динамической модели соответствующей эколого-экономической системы и давать оптимальные по точности прогнозы сценариев развивающихся в ней процессов.

Одним из перспективных методов моделирования сложных систем является метод адаптивного баланса влияний — *Adaptive Balance of Causes (ABC-метод)*, основанный на причинно-следственных связях между моделируемыми процессами [7]. В этом методе принцип условного по отношению к наблюдениям осреднения процессов может быть использован для оценки коэффициентов уравнений динамической модели системы, т. е. для идентификации модели данной системы по архивной информации о ее поведении. Располагая динамической моделью системы, естественно попытаться оценить качество прогнозирования процессов и попытаться улучшить это качество путем усвоения в модели данных наблюдений. Для этого необходимо дополнить *ABC*-модель сложной системы эволюционными уравнениями, дающими корреляционные функции невязок прогнозов и по смыслу аналогичными тем, которые применяются в алгоритме фильтра Калмана [8] и в *DSM* океана [1, 2]. Таким образом, возникает задача построения динамико-стохастических моделей адаптивного баланса влияний (*DSM ABC*) для природных систем.

В настоящей работе эта задача решается путем получения общих уравнений *DSM ABC* для системы взаимосвязанных процессов. Первоначально мы построим динамические уравнения *ABC*-модели сложной системы, предполагая, что ее коэффициенты претерпевают эволюцию с течением времени. Для слежения за их величинами будут введены эволюционные уравнения коэффициентов, основанные на текущих корреляционных связях между процессами. Затем будет рассмотрено качество прогнозирования процессов путем статистического анализа невязок прогнозов. Для этого выводятся эволюционные уравнения корреляционных функций невязок прогнозов и формируется *DSM* системы взаимосвязанных процессов.

Полученные общие уравнения *DSM ABC* рассматриваются на примере простой морской экосистемы. Имитируется баланс влияний в системе, связывающей между собой популяцию некоторых морских организмов, ее пищевую цепь, качество морской среды и объем потребления этих организмов. Решается задача прогноза одного из этих процессов по наблюдениям остальных процессов. Невязки прогнозов используются для усвоения данных наблюдений.

Подобная постановка реанализа наблюдений актуальна в контексте формирующейся в настоящее время идеологии построения геоинформационных систем контроля за состоянием природной среды и потреблением природных ресурсов [9]. По нашему мнению, разработка практических алгоритмов ди-

намико-стохастического моделирования контролируемых параметров природной среды является одной из важных задач, определяющих структуру геоинформационных систем и в конечном итоге эффективность их функционирования.

Общие уравнения динамико-стохастической модели взаимосвязанных процессов. В соответствии с принципами системного подхода к изучению явлений в океане необходимо объединить в единую систему все те из взаимосвязанных процессов, которые наиболее полно характеризуют данное явление [5]. Будем считать, что подобными процессами являются n переменных: $x_1, x_2, \dots, x_n$, формирующих вектор состояния системы. Применим АВС-метод для построения динамической модели системы, образованной этими процессами. С этой целью обозначим через $a_{ij} x_j$ то влияние, которое оказывает процесс x_j на процесс x_i . Коэффициент влияния a_{ij} будем считать переменным, но меняющимся более медленно, чем сам процесс x_i . Примем также, что положительным влияние будет тогда, когда рост x_j вызывает увеличение x_i .

Система динамических уравнений АВС-модели, выражающая собой адаптивный баланс влияний внутри системы имеет следующий вид [7]:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - x_i; \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j). \quad (1)$$

Причинно-следственные отношения между процессами предполагают наличие корреляционных связей между ними. Обозначим $\{R_{ij}\}$ матрицу коэффициентов взаимной корреляции процессов. АВС-метод моделирования позволяет построить эволюционные уравнения для определения коэффициентов влияния a_{ij} через элементы корреляционной матрицы. Можно показать, что АВС-модель коэффициентов влияния должна быть представлена следующей системой уравнений [7]:

$$\frac{da_{ij}}{dt} = R_{ij} - \sum_{k=1}^n a_{ik} R_{ik} - a_{ij}; \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j \neq k). \quad (2)$$

Условимся использовать в этой системе уравнений в качестве $\{R_{ij}\}$ матрицу текущих коэффициентов взаимной корреляции, которая отражает динамику корреляционных связей внутри системы. Полагая, что эти связи меняются медленно по сравнению с изменчивостью самих процессов, можно рассматривать уравнения (1) и (2) как прогностический оператор системы, линеаризованный на интервале времени определения текущей корреляционной матрицы. Такое допущение неизбежно вносит некоторые погрешности моделирования истинных процессов. На интервалах времени прогнозирования, малых по сравнению с интервалами осреднения, используемыми при расчете текущей корреляционной матрицы, ошибки прогнозов будут незначительными. Однако они станут быстро расти с увеличением заблаговременности прогнозов.

При динамико-стохастическом подходе к моделированию природных процессов для корректировки ошибок прогнозов используются непосредст-

венные наблюдения процессов. Будем обозначать их z_{ij} , понимая под этим символом измерение процесса x_i в момент времени t_j . Сравнение прогноза с соответствующим наблюдением в момент времени t_j дает ошибку или невязку прогноза $z_{ij} - x_{ij}$. Невязки прогнозов содержат в себе информацию о качестве предыдущих прогнозов, выполненных на момент времени t_j . Она может быть использована для введения поправок к прогнозам на будущие моменты времени $t_k > t_j$. Идея динамико-стохастического моделирования заключается в том, чтобы параллельно с прогнозированием процессов по их динамической модели (1) — (2) прогнозировать также и невязки прогнозов, используя таким путем ту информацию о процессах, которую приносят с собой их текущие измерения.

Обозначим коэффициенты корреляции невязок прогнозов $P_{ij} = E\{[z_i - x_i][z_j - x_j] \}$. Можно показать, что для невязок прогнозов сохраняется *ABC*-модель (1) [9]. Умножая уравнения для невязок с индексами i на значения невязок с индексами j , выполняя статистическое осреднение получаемых выражений и складывая их попарно, можно получить следующую систему эволюционных уравнений для коэффициентов взаимной корреляции невязок прогнозов [5]:

$$\frac{dP_{ij}}{dt} = \sum_{l=1}^n a_{il} P_{jl} + \sum_{k=1}^n a_{jk} P_{ik} - 2P_{ij}; \quad (i, j, k, l = 1, 2, \dots, n), \quad (l \neq i; k \neq j). \quad (3)$$

Решения системы уравнений (3) дают возможность находить оптимальные (по среднеквадратичному критерию) весовые коэффициенты g_i невязок прогнозов для получения поправок к прогнозам процессов в последующий момент времени. Значения весовых коэффициентов определяются из системы уравнений *ABC*-модели, аналогичной системе уравнений для коэффициентов влияния (2):

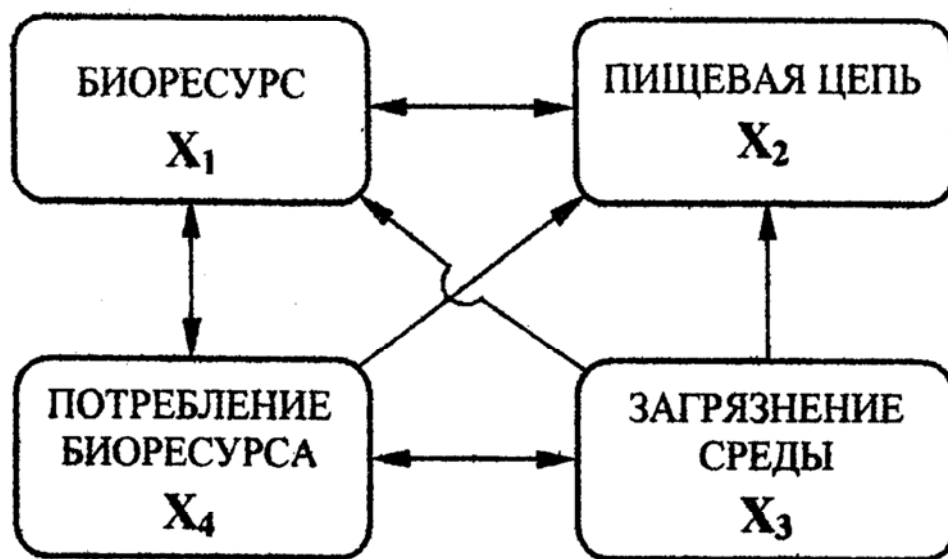
$$\frac{dg_{ij}}{dt} = P_{ij} - \sum_{k=1}^n g_{ik} P_{jk} - g_{ij}; \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n), \quad (i \neq j \neq k). \quad (4)$$

Оптимальные прогностические оценки процессов x_i^{opt} теперь могут быть представлены в виде следующей *ABC*-модели [5, 7]:

$$\frac{dx_i^{\text{opt}}}{dt} = x_i + \sum_{j=1}^n g_{ij} \left(\frac{1}{z_{ij}} - \frac{1}{x_{ij}} \right) - x_i^{\text{opt}}. \quad (5)$$

Значки над переменными, стоящими в скобках, обозначают принадлежность измерений и прогнозов, образующих невязки, к предыдущему моменту времени. Таким образом, уравнения (1) — (5) представляют собой замкнутый алгоритм динамико-стохастической *ABC*-модели системы взаимосвязанных природных процессов.

Динамико-стохастическая модель морской экосистемы. Полученные общие уравнения целесообразно рассмотреть на каком-либо конкретном примере. Для иллюстрации достаточно использовать пример простой морской экосистемы, изображенной на рис. 1. Предположим, что экосистема характеризуется четырьмя взаимосвязанными процессами: x_1 , x_2 , x_3 и x_4 . Эти процессы представляют состояние динамического баланса, в котором находится некоторая популяция морских организмов с параметрами морской среды, необходимыми для ее существования [10]. Пусть x_1 — размер популяции, x_2 — концентрация живых организмов, служащих питанием для данного сообщества, x_3 — количество загрязняющих веществ в воде, ограничивающих рост популяции, x_4 — объемы потребления организмов популяции за счет их промысла. Подобный выбор процессов означает, что переменные x_2 , x_3 и x_4 оказывают непосредственное влияние на процесс x_1 . На рис. 1 изображена схема причинно-следственных связей в рассматриваемой экосистеме, в которой учтены возможные взаимодействия между всеми процессами, объединенными в экосистеме. В частности, предполагается, что концентрация загрязняющих веществ x_3 ограничивает пищевую цепь x_2 и объемы промысла x_4 .



Р и с. 1. Концептуальная модель морской экосистемы

Предположим, что выполняются регулярные (с интервалом времени $\tau = 1$) наблюдения каждого из четырех процессов, что позволяет рассчитывать текущую корреляционную матрицу $\{R_{ij}\}$. Изменчивость корреляционных связей между процессами будем относить за счет множества неучтенных в модели влияющих факторов, а также переменных внешних воздействий на систему. Следствием этого являются переменные коэффициенты влияния в уравнениях ABC-модели экосистемы, которая становится нелинейной.

Используя общий алгоритм ABC-моделирования (1) — (2), выпишем уравнения для процессов и для коэффициентов влияния модели экосистемы [11]:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 - x_1, \\
\frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_1 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 - x_2, \\
\frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{34}x_4 - x_3, \\
\frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 - x_4,
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\frac{da_{12}}{dt} &= R_{12} - R_{13}a_{13} - R_{24}a_{14} - a_{12}, & \frac{da_{21}}{dt} &= R_{21} - R_{13}a_{23} - R_{14}a_{24} - a_{21}, \\
\frac{da_{13}}{dt} &= R_{13} - R_{23}a_{12} - R_{34}a_{14} - a_{13}, & \frac{da_{23}}{dt} &= R_{23} - R_{13}a_{21} - R_{34}a_{24} - a_{23}, \\
\frac{da_{14}}{dt} &= R_{14} - R_{24}a_{13} - R_{34}a_{13} - a_{14}, & \frac{da_{24}}{dt} &= R_{24} - R_{14}a_{21} - R_{34}a_{23} - a_{24}, \\
\frac{da_{31}}{dt} &= R_{31} - R_{12}a_{32} - R_{14}a_{34} - a_{31}, & \frac{da_{41}}{dt} &= R_{41} - R_{12}a_{42} - R_{13}a_{43} - a_{41}, \\
\frac{da_{32}}{dt} &= R_{32} - R_{12}a_{31} - R_{24}a_{34} - a_{32}, & \frac{da_{42}}{dt} &= R_{42} - R_{12}a_{41} - R_{23}a_{43} - a_{42}, \\
\frac{da_{34}}{dt} &= R_{34} - R_{14}a_{31} - R_{24}a_{32} - a_{34}, & \frac{da_{43}}{dt} &= R_{43} - R_{13}a_{41} - R_{23}a_{42} - a_{43}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Построенные системы уравнений представляют динамическую АВС-модель экосистемы. Она позволяет прогнозировать каждый из наблюдаемых в экосистеме процессов. Для того чтобы получить оптимальные по точности прогнозы, введем в рассмотрение невязки прогнозов по отношению к наблюдениям. Пользуясь формулами (3), выпишем эволюционные уравнения для коэффициентов корреляции ошибок прогнозов, расположенных выше главной диагонали в матрице $\{P_{ij}\}$:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{12}}{dt} &= a_{12}P_{22} + a_{13}P_{23} + a_{21}P_{11} + a_{14}P_{24} + a_{23}P_{13} + a_{24}P_{14} - 2P_{12}, \\
\frac{dP_{13}}{dt} &= a_{12}P_{23} + a_{13}P_{33} + a_{14}P_{34} + a_{31}P_{11} + a_{32}P_{12} + a_{34}P_{14} - 2P_{13}, \\
\frac{dP_{14}}{dt} &= a_{12}P_{24} + a_{13}P_{34} + a_{14}P_{44} + a_{41}P_{11} + a_{42}P_{12} + a_{43}P_{13} - 2P_{14}, \\
\frac{dP_{23}}{dt} &= a_{21}P_{13} + a_{23}P_{33} + a_{24}P_{34} + a_{31}P_{12} + a_{32}P_{22} + a_{34}P_{24} - 2P_{23}, \\
\frac{dP_{24}}{dt} &= a_{21}P_{41} + a_{23}P_{43} + a_{24}P_{44} + a_{41}P_{12} + a_{42}P_{22} + a_{43}P_{23} - 2P_{24}, \\
\frac{dP_{34}}{dt} &= a_{31}P_{14} + a_{32}P_{24} + a_{34}P_{44} + a_{41}P_{13} + a_{42}P_{23} + a_{43}P_{33} - 2P_{34}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Аналогичные уравнения имеют место для остальных элементов матрицы.

Весовые коэффициенты корректировки прогнозов теперь могут быть найдены из системы уравнений (4):

$$\begin{aligned}
\frac{dg_{12}}{dt} &= P_{12} - P_{13}g_{13} - P_{24}g_{14} - g_{12}, & \frac{dg_{21}}{dt} &= P_{21} - P_{13}g_{23} - P_{14}g_{24} - g_{21}, \\
\frac{dg_{13}}{dt} &= P_{13} - P_{23}g_{12} - P_{34}g_{14} - g_{13}, & \frac{dg_{23}}{dt} &= P_{23} - P_{13}g_{21} - P_{34}g_{24} - g_{23}, \\
\frac{dg_{14}}{dt} &= P_{14} - P_{24}g_{13} - P_{34}g_{13} - g_{14}, & \frac{dg_{24}}{dt} &= P_{24} - P_{14}g_{21} - P_{34}g_{23} - g_{24}, \\
\frac{dg_{31}}{dt} &= P_{31} - P_{12}g_{32} - P_{14}g_{34} - g_{31}, & \frac{dg_{41}}{dt} &= P_{41} - P_{12}g_{42} - P_{13}g_{43} - g_{41}, \\
\frac{dg_{32}}{dt} &= P_{32} - P_{12}g_{31} - P_{24}g_{34} - g_{32}, & \frac{dg_{42}}{dt} &= P_{42} - P_{12}g_{41} - P_{23}g_{43} - g_{42}, \\
\frac{dg_{34}}{dt} &= P_{34} - P_{14}g_{31} - P_{24}g_{32} - g_{34}, & \frac{dg_{43}}{dt} &= P_{43} - P_{13}g_{41} - P_{23}g_{42} - g_{43}.
\end{aligned} \tag{9}$$

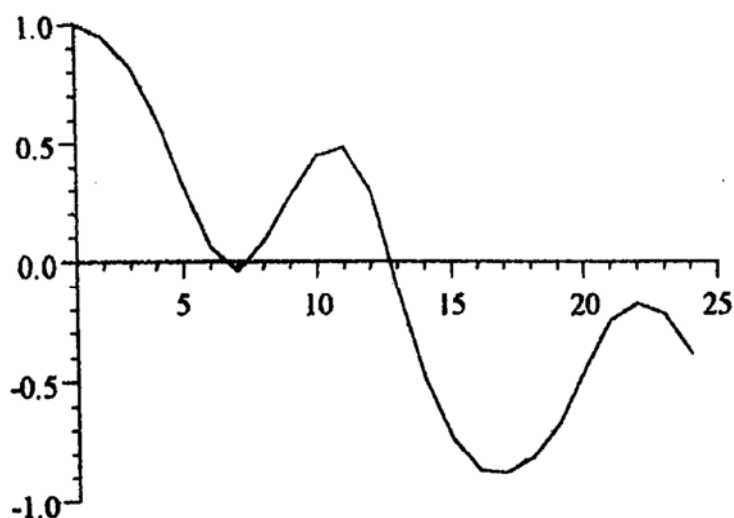
Оптимальные прогностические оценки процессов в экосистеме являются решениями следующей системы динамических уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1^{\text{opt}}}{dt} &= x_1 + \sum_{i=1}^4 g_{1i}(z_i - x_i) - x_1^{\text{opt}}, \\
\frac{dx_2^{\text{opt}}}{dt} &= x_2 + \sum_{i=1}^4 g_{2i}(z_i - x_i) - x_2^{\text{opt}}, \\
\frac{dx_3^{\text{opt}}}{dt} &= x_3 + \sum_{i=1}^4 g_{3i}(z_i - x_i) - x_3^{\text{opt}}, \\
\frac{dx_4^{\text{opt}}}{dt} &= x_4 + \sum_{i=1}^4 g_{4i}(z_i - x_i) - x_4^{\text{opt}}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Как следует из приведенных уравнений *DSM ABC* морской экосистемы, возможно непрерывное усвоение в модели данных наблюдений, относящихся ко всем четырем процессам. Модель обеспечивает оптимальные прогнозы каждого из процессов. Для их получения необходимо решить 11 систем уравнений (6) — (10). В тех случаях, когда имеются в достаточном количестве архивные данные наблюдений процессов, развивающихся в системе, можно упростить процедуру усвоения данных в динамической модели системы. Вместо решения эволюционных уравнений для коэффициентов корреляции невязок прогнозов (8) достаточно организовать вычисление их текущих значений $\{P_{ij}\}$ непосредственно по архивным данным. Это сокращает число систем уравнений в *DSM ABC* до 10.

Вычислительные эксперименты с моделью экосистемы. Чтобы упростить использование эволюционных уравнений модели экосистемы, введем некоторые не принципиальные допущения. Будем считать, что наблюдения процессов не вносят погрешностей в их значения, т. е. они являются точными. Предположим далее, что для корректировки прогнозов будут использоваться только одиночные невязки предсказания процессов, полученные в предыдущий по отношению к прогнозу момент времени.

Для проверки эффективности алгоритма уравнений *DSM ABC* (6) — (10) необходимо располагать «измерениями» четырех взаимосвязанных случайных процессов, характеризующих состояние экосистемы. В проведенном вычислительном эксперименте динамика экосистемы была имитирована следующим образом. Первоначально был генерирован процесс, представлявший собой последовательность случайных чисел, интервал между которыми (шаг по времени) был принят равным 1. Он имел корреляционную функцию, которая изображена на рис. 2 и имеет масштаб по горизонтальной оси графика, равный 5 шагам по времени.



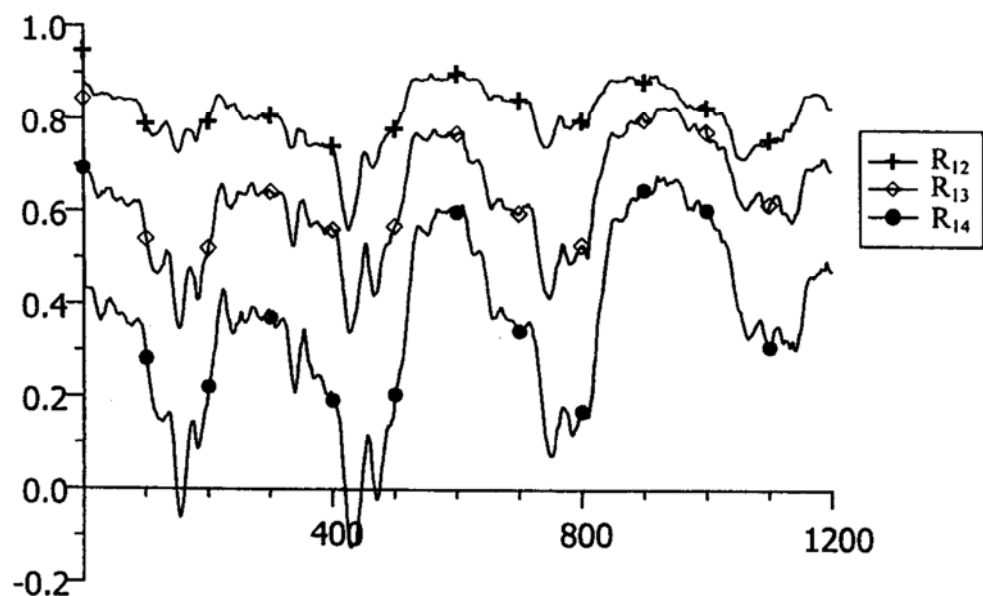
Р и с. 2. Корреляционная функция имитированного ряда наблюдений

Далее из исходного ряда наблюдений были образованы 4 взаимосвязанных ряда, сдвинутых по времени на 5 шагов, относительно друг друга. Исходный ряд был принят за процесс x_1 — наблюдаемые изменения размера популяции; ряд, сдвинутый на 5 шагов назад, — за процесс x_2 — параметр пищевой цепи популяции; ряд, сдвинутый на 10 шагов, — за процесс x_3 — содержание загрязнений в морской воде; ряд, сдвинутый на 15 шагов, — за процесс x_4 — объемы промысла. Как следует из рис. 2, коэффициенты взаимной корреляции между процессами изменялись в пределах от 0,9 до 0,6. Однако стохастические связи между процессами не были стационарными. Об этом свидетельствуют частные коэффициенты взаимной корреляции, которые вычислялись на каждом шаге моделирования по выборкам длиной в 100 шагов по времени. Динамика коэффициентов корреляции R_{12} , R_{13} и R_{14} представлена на рис. 3, а.

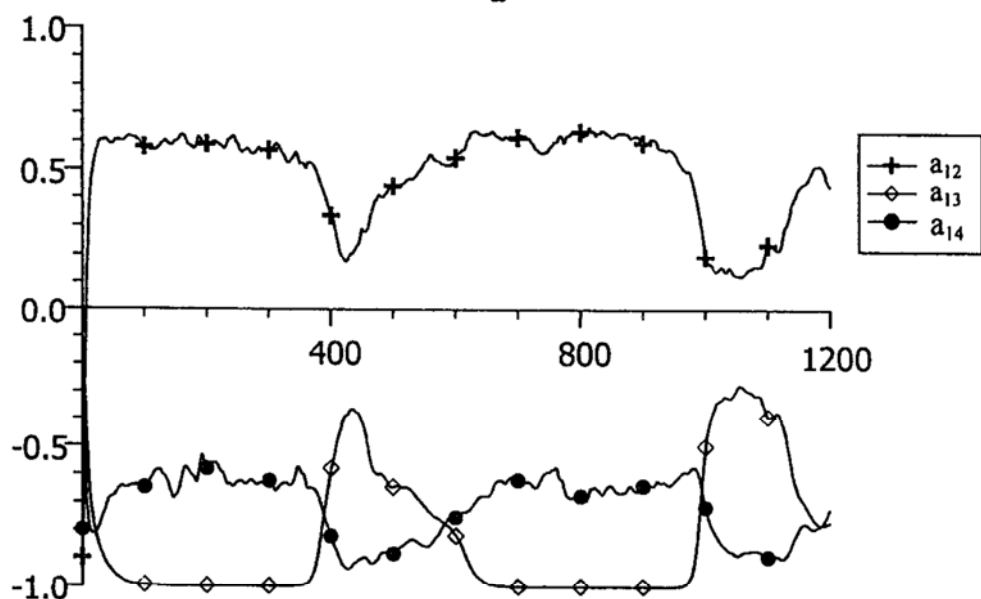
Располагая матрицей коэффициентов взаимной корреляции, можно построить *ABC*-модели текущих значений коэффициентов влияния (7). Это дает возможность отслеживать динамику влияний внутри системы, которая становится нелинейной, поскольку адаптация процессов друг к другу и подстройка коэффициентов влияния происходят одновременно. Изменчивость коэффициентов влияния, рассчитанная по уравнениям первой из *ABC*-моделей (7), показана на рис. 3, б.

Обращает на себя внимание тот факт, что знаки влияний процессов x_2 , x_3 и x_4 на процесс x_1 оказались такими, какими они должны быть по смыслу в имитированной экосистеме. Несмотря на то, что все процессы связаны между собой положительными корреляционными связями, влияние пищевой цепи x_2 оказалось положительным, а влияния загрязнений x_3 и промысла x_4 — отрицательными. В этом проявляется отличие причинно-следственных зависимо-

стей от корреляционных связей. Последние устанавливают лишь факт существования зависимости между случайными процессами, но не дают информации о том, какие из них относятся к причинам, а какие к следствиям. Причинно-следственные отношения между процессами могут быть идентифицированы лишь после объединения их в систему и построения *ABC*-моделей (6) — (7).



а

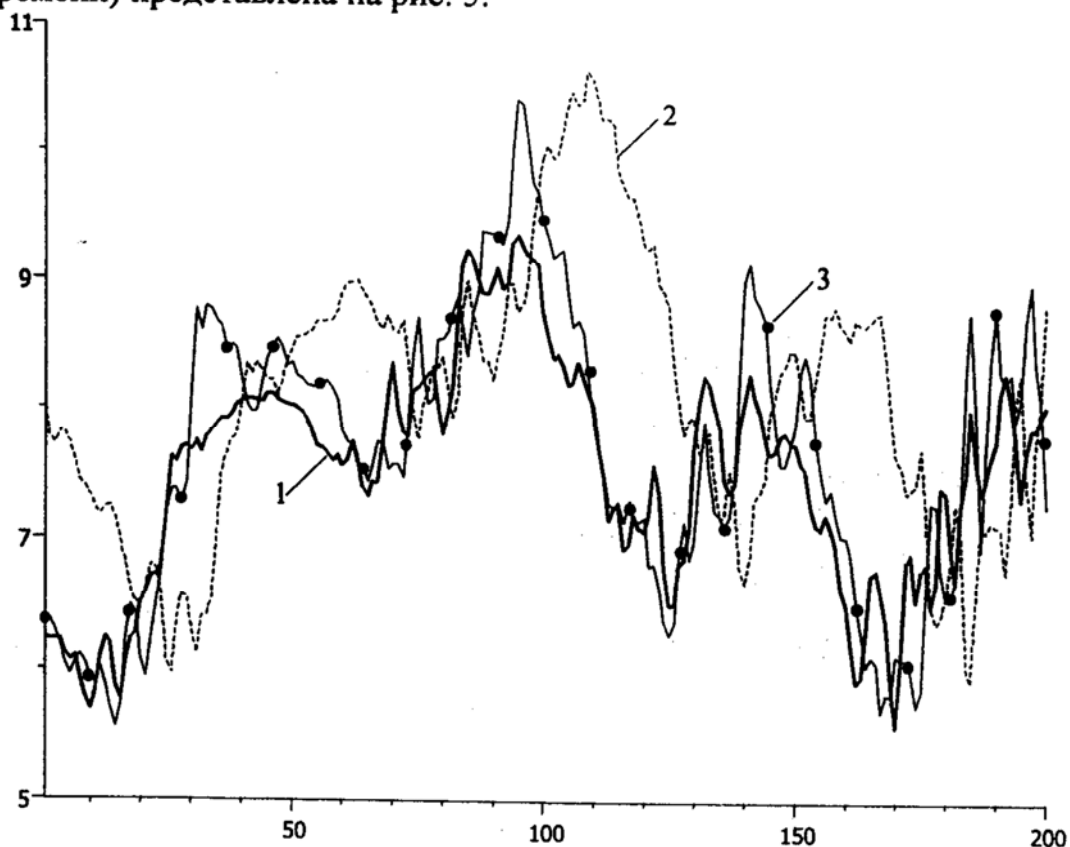


б

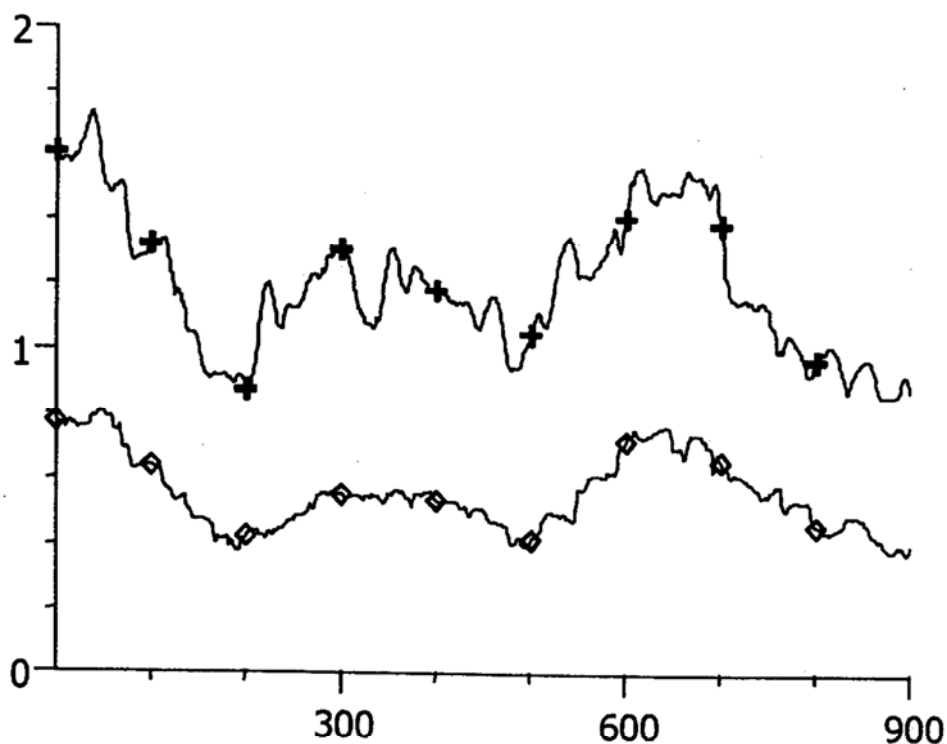
Р и с. 3. Текущие значения коэффициентов взаимной корреляции R_{12} , R_{13} , R_{14} , (а) и изменчивость коэффициентов влияния a_{12} , a_{13} , a_{14} (б)

С вычисленными переменными коэффициентами влияния, показанными на рис. 3, б, был выполнен прогноз процесса x_1 на 5 шагов вперед. С учетом процедуры имитации рядов наблюдений процедура прогноза фактически заключалась в использовании измерений процессов x_2 , x_3 и x_4 для восстановления по ним процесса x_1 . Результаты прогнозирования приведены на рис. 4,

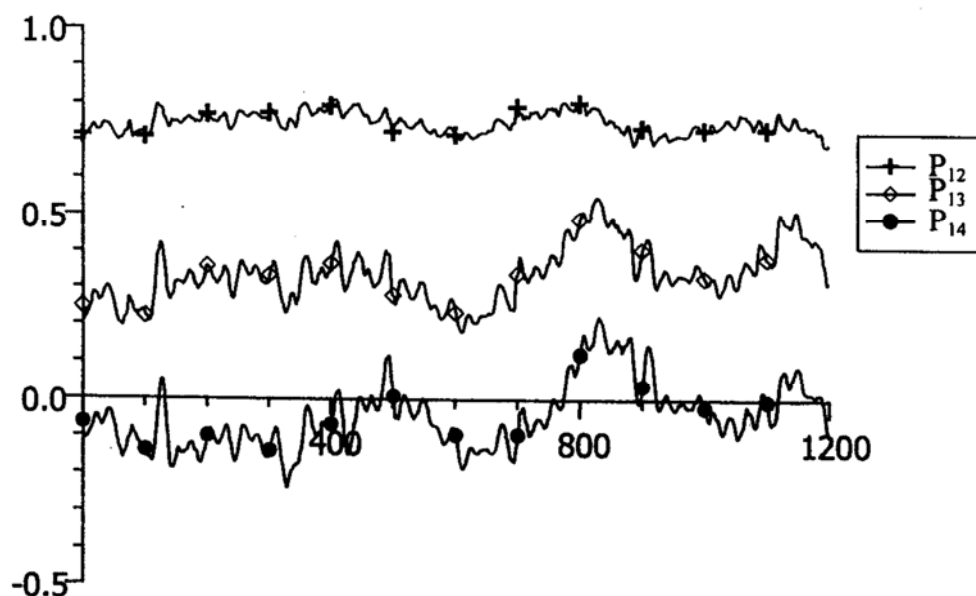
где они могут быть сопоставлены с истинными значениями процесса x_1 . Динамика стандартных отклонений прогнозов (по выборкам длиной в 100 шагов по времени) представлена на рис. 5.



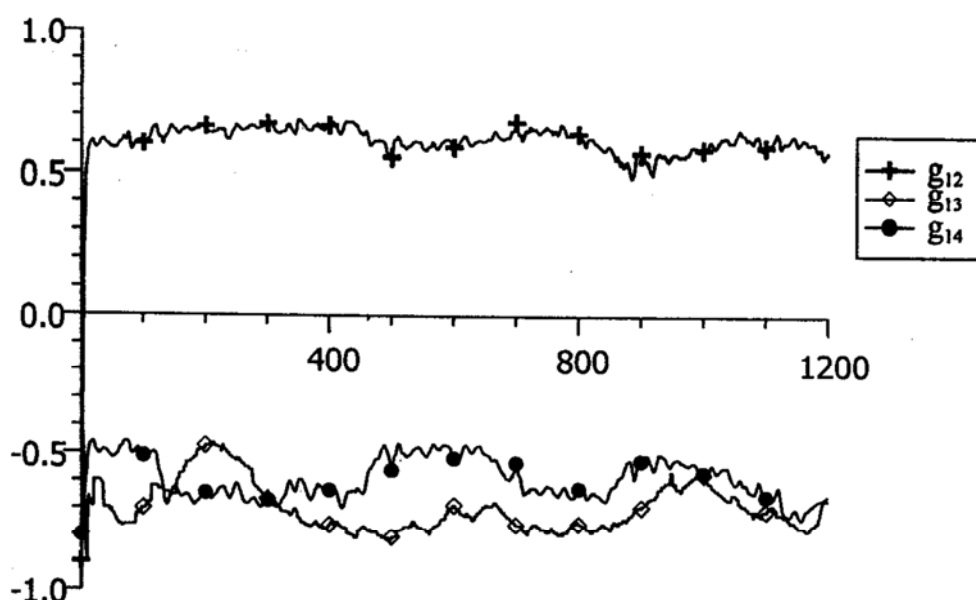
Р и с. 4. Результаты прогнозирования имитированного временного ряда: 1 — истинный ряд, 2 — прогноз ряда по модели (6) — (7), 3 — оптимальный прогноз по модели (6) — (10)



Р и с. 5. Стандартные отклонения прогнозов временного ряда наблюдений: 1 — по модели (6) — (7), 2 — по модели (6) — (10)



а



б

Р и с. 6. Текущие значения коэффициентов взаимной корреляции невязок прогнозов P_{12} , P_{13} , P_{14} (а) и весовые коэффициенты усвоения данных наблюдений g_{12} , g_{13} , g_{14} (б)

Далее была осуществлена корректировка прогнозов путем прогнозирования невязок и получения оптимальных оценок x_1^{opt} на основе алгоритма (8) — (10). Текущие коэффициенты корреляции невязок прогнозов P_{12} , P_{13} и P_{14} изображены на рис. 6, а, а вычисленные из системы уравнений (9) весовые коэффициенты усвоения наблюдений g_{12} , g_{13} и g_{14} — на рис. 6, б.

Оптимальный прогноз процесса x_1 на 5 шагов вперед показан на рис. 4. Непосредственное сравнение графиков на этом рисунке дает представление о погрешностях прогнозирования. Усвоение данных наблюдений и построение оптимальной оценки имеют x_1^{opt} выраженный положительный эффект, поскольку оптимальный прогноз оказывается ближе к исходному ряду x_1 , чем прогноз без усвоения данных наблюдений. Этот вывод подтверждается графиками стандартных отклонений от истинного ряда при прогнозе процесса

по динамической модели (6) — (7) и при оптимальном прогнозе по модели (6) — (10). Динамика этих оценок показана на рис. 5.

Заключение. Предложенный общий алгоритм построения динамико-стохастических моделей адаптивного баланса влияний может быть использован для контроля взаимосвязанных процессов, развивающихся в природной среде и в эколого-экономических системах. Рассмотренный пример простой экосистемы показывает, каким образом следует формировать структуру геоинформационной системы, предназначенной для контроля за состоянием морских биоресурсов и управления ими. Наряду со средствами мониторинга процессов в экосистеме и банками данных, накапливающими информацию о динамике этих процессов, основную роль в структуре геоинформационных систем играют уравнения *DSM ABC*. С их помощью осуществляются диагнозы и прогнозы процессов в экосистеме. Существенно, что в рамках принятых допущений алгоритм *DSM ABC* является оптимальным по точности прогнозирования, поскольку он основан на результатах классической теории оптимальной фильтрации. Следует также отметить, что использование переменных коэффициентов влияния в *DSM ABC* позволяет отслеживать нелинейное взаимодействие между процессами в экосистемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е. Динамико-стохастические модели состояния океана. — Киев: Наук. думка, 1981. — 190 с.
2. Timchenko I.E. Stochastic Modeling of Ocean Dynamics// Chur — London — Paris — New-York: Harwood Acad. Publ., 1984. — 320 p.
3. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей// Изв. АН СССР. Сер. матем. — 1941 — 5. — С. 3 — 13.
4. Нелепо Б.А., Тимченко И.Е. Системные принципы анализа наблюдений в океане. — Киев: Наук. думка, 1978. — 222 с.
5. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана. — Киев: Наук. думка, 1988. — 180 с.
6. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Динамика эколого-экономических систем. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — С. 62 — 77.
7. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — 225 с.
8. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems// J. Basic Engin., Trans. of ASME, March 1960. — P. 35 — 45.
9. Тимченко И.Е., Изумнова Е.М., Солодова С. М. Управление природными ресурсами. Имитационная технология ABC AGENT. — Севастополь, 2001. — 95 с. — (Препринт / НАН Украины. МГИ).
10. Математические модели в биологической океанографии/ Под ред. Т. Платта, К.Х. Манна, Р.Е. Улановича. — Париж: Изд-во ЮНЕСКО, 1984. — 195 с.
11. Изумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование процессов адаптации в экосистемах// Морской гидрофизический журнал. — 2003. — №1. — С. 46 — 57.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 02.04.03

ABSTRACT Method of construction of Dynamic-Stochastic Models (DSM) of natural systems is proposed based on assimilation of the observation data in the prediction equations of the coupled processes. The method Adaptive Balance of Causes is used in these models for obtaining evolutionary equations of the processes and assimilating observation data in them. The obtained general equations are considered on the example of a marine ecosystem where four coupled processes develop. It is shown that optimal prediction of these processes requires solution of 11 equation systems where prediction estimates and model coefficients are simultaneously adapted to the observations. A simulation calculation experiment explaining the algorithm of the proposed method of modeling is considered. The conclusion on good prospects of its application in geo-information systems for the environmental control is drawn.